

УДК 678.6

А. В. Спиглазов, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);**Е. И. Кордикова**, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);**О. И. Карпович**, кандидат технических наук, доцент (БГТУ); **А. Н. Калинин**, инженер (БГТУ)

СОВМЕЩЕНИЕ ВОЛОКНИСТОГО НАПОЛНИТЕЛЯ С ТЕРМОПЛАСТИЧНЫМИ ПОЛИМЕРАМИ

Предложен эффективный и экономически выгодный способ совмещения волокнистой композиции из отходов стеклопластика и термопластичных полимеров. В качестве смесителя компонентов используется дисковый экструдер. Исследована и доказана эффективность предложенного решения. Получены вторичные композиционные материалы, имеющие более высокие значения физико-механических свойств, более длинные волокна в своем составе по отношению к аналогичным материалам, полученным в червячном экструдере.

The method of combination of a waste of glass fibres and thermoplastic polymers is offered. As the mixer of components the disk extruder is used. The effectiveness of the proposed solutions was investigated and proved experimentally. The secondary composite materials having higher values of physico-mechanical properties, longer fibres in the composition in relation to the analogous materials gained in the screw extruder are gained.

Введение. По экономическим соображениям при утилизации волокнистой фракции отходов стеклопластиков путем изготовления стеклоармированной композиции и формования изделий в качестве матрицы целесообразно использовать некондиционные отходы термопластичных полимеров и их смеси и вводить в композицию по возможности высокую долю волокон.

Согласно известной модели Келли – Тайсона [1], при наличии прочной адгезионной связи волокон с матрицей прочность при растяжении полимера, хаотически армированного дискретными волокнами, пропорциональна прочности и доле волокон, длина которых превышает эффективную. В то же время средняя длина стеклянных волокон, выделяемых из отходов стеклопластика экономически обоснованными способами, обычно не превышает 10 мм.

При экструзионном совмещении хрупких стеклянных волокон с полимерными расплавами интенсивность разрушения волокон возрастает по мере увеличения вязкости полимерного расплава и доли вводимых в него волокон.

Присутствие в композиции значительной доли коротких волокон обуславливает более интенсивное изнашивание рабочих поверхностей шнека и цилиндра экструдера. Дополнительные затраты на восстановление дорогих, но быстро изнашивающихся деталей экструдера также снижают технико-экономический эффект утилизации. В результате оказывается, что изделия, получаемые из отходов стеклопластика и полимеров, неконкурентоспособны по сравнению с аналогичными изделиями конструкционного назначения из первичных и вторичных неармированных полимеров.

Задачи исследований – повысить прочность композиционных материалов и изделий конструкционного назначения, формируемых из отходов

термопластичных полимеров и их смесей и содержащих армирующие волокна, выделенные из отходов стеклопластика, снизить при этом абразивное воздействие волокон на экструдер и в результате повысить технико-экономическую эффективность утилизации отходов стеклопластика и отходов термопластичных полимеров.

Основная часть. Метод переработки вторичной волокнистой композиции включает несколько стадий:

- дозированный ввод и пластикацию термопластичного матричного полимера или смеси полимеров в червячном экструдере-пластикаторе;
- дозированный ввод армирующих волокон и совмещение их с расплавом матричного полимера или их смеси в рабочей полости экструдера-смесителя;
- вывод пластицированной композиции из рабочей полости экструдера-смесителя через выходное отверстие и формирование изделия из полученной композиции.

Армирующие волокна совмещают с расплавом термопластичного полимера или смеси полимеров в дисковом экструдере. Расплав матричного полимера вводят в рабочую полость дискового экструдера в области периферии диска, а армирующие волокна – в срединную часть полости через отверстие в корпусе дискового экструдера.

Дисковые экструдеры позволяют при относительно малых энергозатратах достигать высоких значений накопленной деформации сдвига, характеризующей смесительный эффект. Благодаря этому волокна, вводимые в такой экструдер, равномерно перемешиваются с расплавом матричного полимера.

В то же время дисковые экструдеры характеризуются низкими значениями давления, создаваемого на выходе из экструдера. Для совмещения армирующих волокон с расплавом

матричного полимера по экономическим соображениям необходимо иметь высокую производительность. Это достигается за счет увеличения частоты вращения диска и уменьшения зазора между диском и корпусом. Но в обоих случаях возрастает скорость сдвига, что приводит к разрушению армирующих волокон. Данное противоречие устраняется за счет оптимизации режимов совмещения по критерию максимума целевой функции:

$$F(D, r, \omega, h, d, \mu, n) = \dot{\gamma}(D, r, \omega, h, d, \mu, n) \cdot P_3(D, r, \omega, h, d, \mu, n), \quad (1)$$

где $\dot{\gamma}(D, r, \omega, h, d, \mu, n)$ – накопленная деформация сдвига при перемещении композиции от точки ввода армирующих волокон с радиальной координатой r до выходного отверстия, ось которого совпадает с осью диска; $P_3(D, r, \omega, h, d, \mu, n)$ – доля в композиции армирующих волокон, длина которых превышает эффективную; D – диаметр диска; r – радиальное расстояние от точки оси входного отверстия для ввода армирующих волокон до оси выходного отверстия экструдера-смесителя; ω – угловая скорость диска; h – ширина рабочей полости экструдера-смесителя (зазор между корпусом и диском); d – диаметр выходного отверстия; μ и n – коэффициент консистенции и показатель степени в законе течения пластичной композиции.

Накопленную деформацию сдвига, входящую в формулу (1), определяют, используя известные зависимости ее от параметров рабочей полости дискового экструдера и угловой скорости диска.

Так, накопленная деформация сдвига при совмещении компонентов в дисковом экструдере связана с параметрами экструдера соотношением:

$$\dot{\gamma}(D, r, \omega, h, d, \mu, n) = \frac{\pi \omega h (D^3 - d^3)}{12 h \sqrt{3} Q_v(d, \mu, n)}, \quad (2)$$

где $Q_v(d, \mu, n)$ – объемный расход нелинейно-вязкой жидкости со степенным законом течения через канал круглого сечения диаметром d .

Доля волокон, длина которых больше эффективной, равна

$$P_3(D, r, \omega, h, d, \mu, n) = 1 - F_6(L_3, D, r, \omega, h, d, \mu, n) \quad (3)$$

где $F_6(L_3, D, r, \omega, h, d, \mu, n)$ – значение функции распределения длины волокон для аргумента L_3 , равного, в свою очередь, эффективной длине отрезка волокна, растягиваемого полимерным расплавом со скоростью сдвига:

$$\dot{\gamma}(r, \omega, h, d, \mu, n) = \frac{h \omega^2 r^2}{Q_v(d, \mu, n)}. \quad (4)$$

Длина волокон, получаемых после экструзии в композиции с полимерным расплавом, распределена по закону Вейбулла с параметрами L_3 и V_6 [1–3]. При этом коэффициент вариации длины волокон V_6 имеет значения, близкие к 1. Из этих соотношений находят долю волокон, длина которых больше эффективной.

Из расчетов по предлагаемым формулам следует, что в центральной части рабочей полости дискового экструдера скорости сдвига меньше, чем на периферии, поскольку они обратно пропорциональны отношению расстояния от точки ввода к радиусу диска.

При низких скоростях сдвига меньше разрушительное воздействие полимерного расплава при смешивании с армирующими волокнами. Однако если волокна вводят в дисковый экструдер вблизи от оси диска, то накопленная деформация сдвига композиции до выхода ее из экструдера может оказаться недостаточной для качественного совмещения расплава с армирующими волокнами: они могут быть не полностью покрыты матричным полимером. Волокна, не связанные полимером, имеют низкий армирующий эффект, а прочность композиции может оказаться даже ниже прочности матричного полимера.

С учетом этого и известных соотношений для скоростей сдвига и накопленной деформации в рабочей полости экструдера находится зависимость доли волокон, длина которых больше критической, от расстояния от оси диска до точки ввода армирующих волокон.

Таким образом, имеет место альтернативное влияние скорости сдвига и накопленной деформации сдвига на эффективность совмещения компонентов и разрушение волокон в экструдере-смесителе. Влияние обоих факторов учитывает произведение накопленной скорости сдвига и доли волокон, длина которых больше эффективной, как функция расположения места ввода армирующих волокон (целевая функция).

Анализ целевой функции с использованием указанных выше известных соотношений показывает, что в широком диапазоне варьирования показателей вязких свойств матричного полимера и геометрических параметров дискового экструдера-смесителя экстремум данной целевой функции при массовой доле волокон от 40 до 50% достигается, если армирующие волокна вводятся в рабочую полость дискового экструдера в торцевой части корпуса через отверстие, отстоящее от входного отверстия для расплава термопластичного матричного полимера или смеси полимеров и от оси выходного отверстия для композиции на расстоянии 0,3–0,7 радиуса диска.

Характеристики структуры и свойств композиционного материала на основе смеси термопластичных полимеров АБС-ПП и волокнистых отходов измельченного стеклопластика

| Показатель | Положение точки ввода волокнистой массы в долях от радиуса R диска относительно его центра | | |
|---------------------------------|--|---------|-------|
| | 0,2 R | 0,5 R | 1 R |
| Содержание волокон | | | |
| среднее значение, мас. % | 50 | 50 | 50 |
| коэффициент вариации, % | 10 | 8 | 8 |
| Длина волокон | | | |
| среднее значение, мм | 7,0 | 5,5 | 1,1 |
| доля фракции менее 4 мм, мас. % | 25 | 45 | 95 |
| Среднее значение прочности, МПа | | | |
| при растяжении | 12 | 25 | 19 |
| при изгибе | 24 | 45 | 32 |

Устройство для осуществления предлагаемого метода содержит червячный экструдер-пластикатор термопластичного матричного полимера или смеси полимеров со средствами их дозированного ввода и отверстием для вывода пластицированного полимера, дисковый экструдер для совмещения расплава термопластичного матричного полимера или смеси полимеров с армирующими волокнами, средства дозированного ввода армирующих волокон в рабочую полость дискового экструдера, например шнековый питатель, выходное отверстие для вывода пластицированной композиции из рабочей полости для формования изделия из полученной композиции.

Рабочая полость в дисковом экструдере образована диском и периферийной и торцевой частями корпуса; входное отверстие для расплава термопластичного матричного полимера или смеси полимеров расположено в периферийной части корпуса, образующего рабочую полость, выходное отверстие для композиции – по оси торцевой части корпуса, а отверстие для дозированного ввода армирующих волокон в рабочую полость дискового экструдера – в торцевой части корпуса и отстоит от входного отверстия для расплава термопластичного матричного полимера или смеси полимеров и от оси выходного отверстия для композиции на расстоянии 0,3–0,7 радиуса диска.

Компаунд выдавливали из накопителя, формировали заготовку, из которой прессовали плиты с размерами 250×250×5 мм. Из плит вырезали образцы с размерами 20×20 и 100×100 мм для оценки параметров структуры и стандартные образцы для испытаний на растяжение и изгиб.

После выжигания матричного полимера из образцов с размерами 100×100 мм измеряли длину волокон, находили ее среднее значение и

долю волокон, длина которых меньше эффективной (4 мм).

Результаты испытаний представлены в таблице.

Закключение. Для сравнения из тех же компонентов и при тех же параметрах процесса получали компаунд, загружая волокна в экструдер-смеситель, т. е. с хаотической ориентацией по отношению к направлению винтового канала червяка. В материале, полученном в дисковом экструдере, длина более чем 95 мас. % волокон не менее, чем эффективная (4 мм), тогда как в материале, полученном при совмещении в червячном экструдере, эта доля менее 50%. Средняя длина волокон в материале, полученном из компаунда по предлагаемому способу, на 25% выше.

Прочность при растяжении материала выше на 26%, а при изгибе – на 17%, чем при смешении в червячном экструдере.

Из результатов сравнения следует, что заявленная цель исследования достигается.

Литература

1. Ставров, В. П. Механика композиционных материалов: учеб. пособие. / В. П. Ставров – Минск: БГТУ, 2008. – С. 165.
2. Ставров, В. П. Механизмы разрушения стекловолокна при совмещении с полимерным расплавом в червячном экструдере / В. П. Ставров, Е. В. Шубенкова // The 4th International Symposium on Failure Mechanics of Materials and Structures, 20–23 Oct. 2007. – Augustów, 2007. – P. 251–254;
3. Ставров, В. П. Влияние режимов совмещения компонентов в червячном экструдере на прочность стеклоармированных термопластов / В. П. Ставров, Е. В. Шубенкова // Актуальные проблемы прочности: материалы 46-й Междунар. конф., в 2 ч.: ч. 1; 15–17 окт. 2007 г. / БГТУ. – Витебск, 2007. – С. 270–274.

Поступила 28.02.2013